



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA MATEMÁTICA E DA
NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**MAPEAMENTO GEOLÓGICO ESTRUTURAL DA FORMAÇÃO
TIRADENTES, MESOPROTEROZÓICO, SÃO JOÃO DEL REI,
MINAS GERAIS**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
FERNANDO AUGUSTO ARRUZZO

ORIENTADORES:

Prof. Dr. André Ribeiro

Prof. MsC Felipe Nepomuceno

MARÇO DE 2016

RIO DE JANEIRO - RJ – BRASIL

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA MATEMÁTICA E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO ESTRUTURAL NA FORMAÇÃO
TIRADENTES, MESOPROTEROZÓICO, SÃO JOÃO DEL REI, MINAS
GERAIS**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
FERNANDO AUGUSTO ARRUIZZO**

APROVADO POR:

Prof. Dr. André Ribeiro

Prof. Substituto-MsC. Felipe Nepomuceno

Prof. Substituto-MsC. Adriano Sampaio

Prof. MsC. Debora Nascimento

MARÇO DE 2016

RIO DE JANEIRO - RJ – BRASIL

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo suporte e força durante esses anos de faculdade. À torcida e incentivo das pessoas mais próximas, sempre dando valiosos conselhos.

Agradeço imensamente ao meu orientador André Ribeiro e co-orientador Felipe Nepomuceno pela oportunidade de trabalhar nessa área incrível de São João del Rei com dois geólogos da qualidade que são. Obrigado por me incentivar nas horas mais difíceis e acreditar em minha pessoa. Os ensinamentos vão muito além de geológicos.

Agradeço muito a Douglas Renato, que me ajudou durante minha graduação e monografia. Seu suporte em campo foi de imensa importância para esse trabalho, além de ser um grande amigo. Sem sua ajuda esse trabalho não se concretizaria.

Aos verdadeiros amigos conquistados durante esses anos, companheiros de viagem e de vida, que proporcionaram experiências únicas, tendo papel fundamental tanto para minha formação profissional como crescimento pessoal.

SUMÁRIO

Sumário.....	i
Índice de Figuras.....	iii
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos.....	1
1.2. Metodologia.....	1
1.2.1. Etapa pré-campo.....	1
1.2.2. Etapa de campo.....	1
1.2.3. Etapa pós-campo.....	2
1.3. Localização Geográfica e Vias de Acesso.....	2
2. Contexto Geotectônico.....	3
2.1. Geologia Regional.....	3
2.2. Embasamento em São João del Rei e Tiradentes.....	4
2.3. A Formação Tiradentes e o rifteamento Espinhaço.....	6
3. Geoprocessamento.....	7
3.1. Confecção e integração de mapas base, imagens e modelos.....	7
3.1.1. Produtos gerados através do SRTM.....	7
3.1.2. Mosaico de imagens e georreferenciamento de mapas.....	8
3.2. Interpretação de mapas e estruturas geológicas.....	9
4. Geologia da área mapeada.....	12
4.1. Sequência Tiradentes.....	13
4.2. Sequência São José.....	13
4.3. Sequência Tejuco.....	14
4.4. Sequência Lenheiro.....	16
4.4.1. Pelitos.....	16
4.4.2. Quartzito Fino.....	16
4.4.3. Quartzito Seixoso.....	17
4.5. Diques Metabásicos na região de São João del Rei.....	18
4.6. Pelito Prados.....	19
5. Geologia Estrutural.....	20
5.1. Dobras.....	20
5.2. Clivagem.....	22

5.3. Lineação.....	22
5.4. Falhas e zonas de cisalhamento.....	24
5.5. Veios.....	28
5.6. Conclusões/ fases de deformação.....	30
6. Conclusões e Discussões.....	30
7. Referências Bibliográficas.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo, destacando-se a Serra de São José no rumo NE-SW entre São João del Rei e Prados e a Serra do Lenheiro em São João del Rei.....	2
Figura 2. Localização da área (seta vermelha) na borda sul do Cráton do São Francisco.	3
Figura 3. Embasamento da Formação Tiradentes em São João del Rei (modificado de Ribeiro, 1997). 1- Sericita filito, clorita filito, quartzito, biotita gnaisse fino, 2- metabasitos, metafelsitos, metagranitóides e metagabro, 3- quartzito, clorita filito e sericita filito, 4- sericita filito e rochas metaultramáficas, 5- metagranitóides, 6- metagabro, 7- sucessões proterozóicas das formações Tiradentes (serras do Lenheiro e São José), Barroso, Prados e do Grupo Andrelândia, 8- depósitos fluviais do Rio das Mortes. 9- diques de metabasito.10-falhas.....	4
Figura 4. Coluna estratigráfica mostrando as sequências das formações Tiradentes (Tiradentes, São José, Tejuco e Lenheiro) e as formações Carandaí (representado pelo diamictito nesta figura), Barroso e Prados. No topo da coluna debritos do Terceário e sedimentos recentes e atuais. Figura de Ribeiro <i>et al.</i> , 2003.....	6
Figura 5. Comparação entre a imagem SRTM de 30 metros(A) e de 10 metros(B).....	7
Figura 6. Comparação de imagens mostrando o efeito de profundidade gerado pelo SRTM sotoposto à imagem de satélite.....	8
Figura 7. Resultado final das curvas de nível geradas.....	9
Figura 8. Mapa topográfico Folha São João del Rei 1:25.000, com os mapas geológicos de Arruzzo, 2011 e Silva, D. 2012 sobrepostos às imagens de satélite.....	10

Figura 9. Fotointerpretação de falhas no flanco Sul da Serra do Lenheiro (Rio das Mortes).....	11
Figura 10. Camadas com marcas de onda e camadas com estratificação cruzada na Formação Tiradentes no flanco sul da Serra do Lenheiro.....	13
Figura 11. Estratificação cruzada de grande porte separadas por outras de pequeno porte na Sequência São José, flanco sul da Serra do Lenheiro.....	14
Figura 12. Estratificação cruzada acanalada em quartzito da Sequência Tejuco no flanco norte da Serra do Lenheiro.....	15
Figura 13. Greta de ressecamento em fácies heterolítica da Sequência Tejuco na Serra de São José.....	15
Figura 14. Manchas de redução em pelito da Sequência Lenheiro no flanco norte da Serra do Lenheiro.....	16
Figura 15. Quartzito fino da Sequência Lenheiro no flanco norte da Serra do Lenheiro.....	17
Figura 16. Níveis seixosos em quartzito da Sequência Lenheiro.....	18
Figura 17. Laminação de fluxo ígneo em dique metabásico no flanco norte da Serra do Lenheiro.....	19
Figura 18. Estereograma de igual área de pólos de planos de acamamento sedimentar nos flancos sul e norte da Serra do Lenheiro, hemisfério sul.....	21

Figura 30. Estereograma de igual área de pólos de planos de falhas no flanco norte da Serra do Lenheiro.....30

Figura 31. Seção esquemática mostrando a influência de falhas WNW-ESE na formação da Bacia Carandaí (Ribeiro, 1997).....30

RESUMO

O presente estudo visou uma compilação de dados sobre a geologia das serras de São José e Lenheiro no *software* ArcGIS além de análises estruturais em quartzitos da Fm. Tiradentes. Seções geológicas e estereogramas foram feitos no intuito de compreender as estruturas que formam a Bacia São del Rei.

Durante o Mesoproterozóico um rifteamento deu origem ao Supergrupo Espinhaço. Eventos extensionais subordinados à essa tafrogênese culminaram na formação da Bacia São João del Rei. Os depósitos dessa bacia consistem em uma sucessão quartzítica plataformar com cerca de 1000m de espessura, que podem ser subdivididas em quatro sequências limitadas por discordâncias intraformacionais.

As três primeiras são sequências de mar raso e seus contatos são definidos por descontinuidades. A última sequência é interpretada como um delta de um rio entrelaçado, e pode ser dividida em unidades. A primeira é essencialmente pelítica e interpretada como depósito de pró-delta. A segunda é composta por arenitos finos de frente deltaica e a última inclui arenitos, arenitos seixosos e conglomerados de planície deltaica.

Durante o Neoproterozóico a Formação Tiradentes foi deformada e metamorfizadas em fácies xisto-verde, gerando clivagem ardosiana, cloritóide e cianita, e recristalização parcial das rochas. Dobras foram formadas e estruturas antigas como falhas foram reativadas.

A Serra do Lenheiro configura um grande anticlinal com mergulhos médios de 20° para NE e SE e eixo com caimento de 15° para NE. O dobramento gerou clivagem ardosiana plano-paralela.

ABSTRACT

This work shows a compilation of data, using the program ArcGIS, of Tiradentes Formation. Geological sections and stereograms were used to understand the major structures that form the São João Basin.

During the Mesoproterozoic, extensional events created the Espinhaço System. It is believed that this same tectonic activity has created the São João del Rei basin. The sediments of this basin are a thousand meters thick quartz-arenite dominated package that we can divide in four sequences limited by intraformational unconformities.

The three lower quartzite sequences of the Tiradentes Formation exhibit sedimentary-structural features that are consistent with shallow marine shoreface and are separated by unconformities. The last sequence is a delta sequence called Delta do Lenheiro. It is composed of three members, from base to top, a pelitic unit including claystone and siltite, fine-grained quartzite and coarse pebbly quartzite.

The geological units of the Tiradentes region record low-grade metamorphism and deformation due to tectonics during the Brasiliano Orogeny, a continental collisional event that happened during the assemblage of the Gondwana Supercontinent in Neoproterozoic times, between 600 and 500 Ma.

The major orogenic structures in the region are the Água Santa Syncline, the Lenheiro Anticline and a regional normal fault system. An axial plane foliation and a mineral lineation parallel to fold axes are common structural features. Kyanite and biotite are the main metamorphic index minerals. Well preserved primary sedimentary and igneous features allow interpreting the origin of the rocks and the depositional history of the successions. Moreover, tectonic reactivation during late Mesozoic and Cenozoic times produced mafic dikes and local fault bounded basins filled with alluvial debris.

1.Introdução

1.1. Objetivos

Esse trabalho possui como objetivo uma compilação de mapas geológicos da Formação Tiradentes. Além disso, tem como finalidade a produção de um mapa geológico, na escala de 1:16.000 das Serras de São José e do Lenheiro, com a ajuda de seções geológicas para melhor entendimento da geologia estrutural e estratigrafia da área.

1.2. Metodologia

A metodologia empregada nesse trabalho consistiu em análises bibliográficas, trabalhos de campo e algumas etapas de geoprocessamento. Podemos dividir a elaboração desse trabalho em 3 fases distintas: uma fase preparatória pré-campo; incursões ao campo; e uma última fase de escritório no intuito de processar os dados gerados nas primeiras fases.

1.2.1. Etapa Pré-campo

Na primeira fase, pré-campo, foram digitalizados e georreferenciados mapas geológicos já realizados por Ribeiro, A. 1997 e de alunos de graduação que cursaram a disciplina curricular obrigatória Estágio de Campo 1 (IGLU 01) do Departamento de Geologia da UFRJ durante os anos de 20 Foram utilizadas também imagens de satélite das serras de São José e Lenheiro.

Sendo assim, foi feita uma análise sobre esses mapas no intuito de melhorar e verificar alguns pontos que julgamos necessário. As imagens também foram interpretadas e foram destacadas as feições que mais chamavam a atenção, como grandes lineamentos e contatos bruscos entre corpos rochosos.

Além disso, as imagens foram de grande ajuda quando utilizadas para procurar afloramentos nas áreas com muita cobertura de solos, colúvios e/ou vegetação e localizar acessos das zonas mais inóspitas.

Todo o processo de geoprocessamento será descrito minuciosamente em um tópico à frente.

1.2.2. Etapa de Campo

Foram feitas duas campanhas de campo, em fevereiro e agosto de 2015. Foram também utilizados dados levantados pelo graduando em iniciação científica apresentada em 2011 (Arruzzo, 2011).

No campo foram tiradas atitudes das camadas, orientações de veios de quartzo, mergulhos de planos de clivagem e paleocorrentes em estratificações cruzadas.

1.2.3. Etapa Pós-campo

Nesta etapa foi feita a digitalização e tratamento dos dados coletados em campo, como descrições de afloramentos, perfis, seções e fotografias.

Os dados gerados foram passados para os programas ArcGis versão 9.3 e Estereonet. Ajustes e correções foram feitos nas fotointerpretações das imagens de satélite a partir dos dados geológicos colhidos em campo. O resultado final foi um mapa geológico georreferenciado, no qual os contatos foram sensivelmente melhorados e análises estruturais incluindo seções geológicas no flanco norte da Serra do Lenheiro. O *datum* utilizado nesse trabalho foi WGS 1984, com coordenadas geodésicas.

1.3. Localização Geográfica e vias de acesso

As serras do Lenheiro e São José compõem a paisagem na região de São João del Rei e Tiradentes, no sul de Minas Gerais. O acesso desde o Rio de Janeiro é feito até Barbacena pela BR-040 e daí pela BR-265 até São João del Rei (Fig. 1).



Figura 1. Localização da área de estudo, destacando-se a Serra de São José no rumo NE-SW entre São João del Rei e Prados e a Serra do Lenheiro em São João del Rei.

2. Contexto Geotectônico

2.1 Geologia Regional

A área de estudo situa-se na borda sul do Cráton do São Francisco, cujo contorno é definido na região pelas frentes orogênicas relacionadas a faixas móveis neoproterozóicas Brasília e Ribeira.

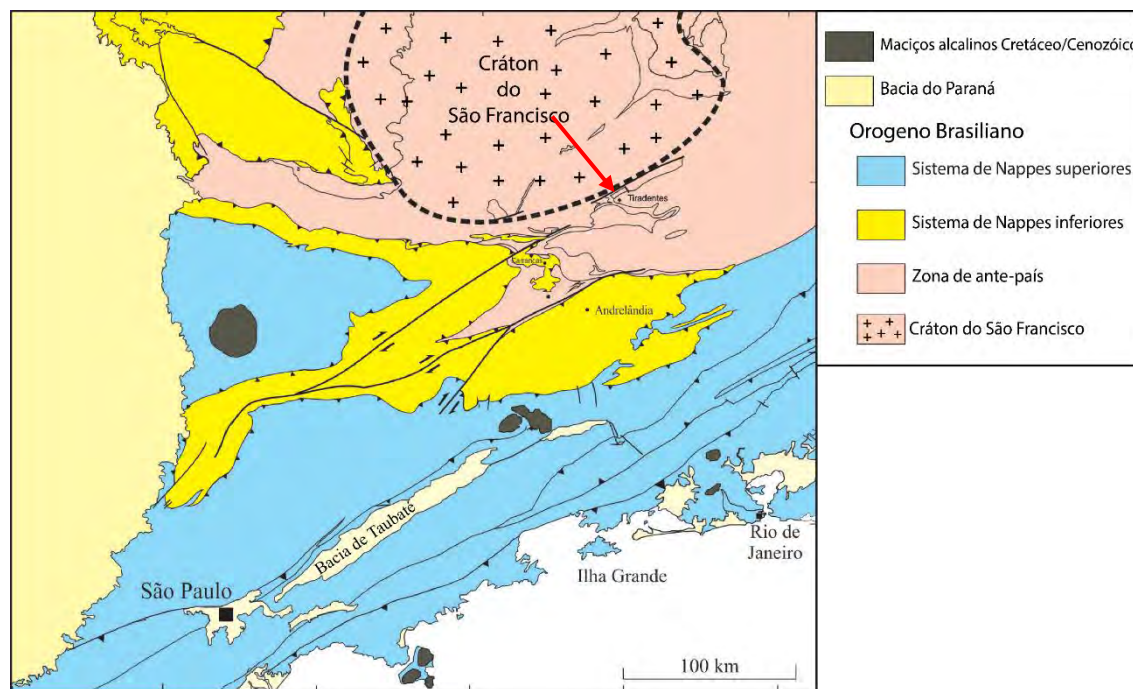


Figura 2. Localização da área (seta vermelha) na borda sul do Cráton do São Francisco.

O embasamento do Cráton do São Francisco compreende complexos gnáissicos, e faixas do tipo *greenstone belt* (Noce, 2000), parte de uma plataforma estabilizada no Neoarqueano e Paleoproterozóico. Na margem dessa plataforma, durante o Paleoproterozóico, ocorreu a deposição das sucessões do Supergrupo Minas, com exceção dos grupos Sabará e Itacolomi. Ainda no Paleoproterozóico processos de subducção intraoceânica deram origem a uma série de rochas ígneas, máficas até félsicas, plutônicas, subvulcânicas e vulcânicas, e rochas sedimentares, que constituem o Cinturão Mineiro (CM; Teixeira, 1985). As sucessões de crosta oceânica, sedimentos de mar profundo e de arco magmático foram deformadas e metamorfizadas em facies xisto verde até anfibolito durante a orogênese Transamazônica. Resultou o cinturão de rumo SW-NE com aproximadamente 170 km de exposição de rochas (Noce *et al.*, 2000;

2007; Teixeira *et al.*,2000; Ávila *et al.*, 2010) que constitue o embasamento da Formação Tiradentes

2.2. Embasamento da Formação Tiradentes

Nos arredores das Serras de São José e Lenheiro as unidades do embasamento distribuem-se em faixas NE-SW, com mergulhos íngremes para SE ou NW (Ebert, 1957a; Valeriano, 1985). Estas faixas integram ou fazem parte do Cinturão Mineiro.

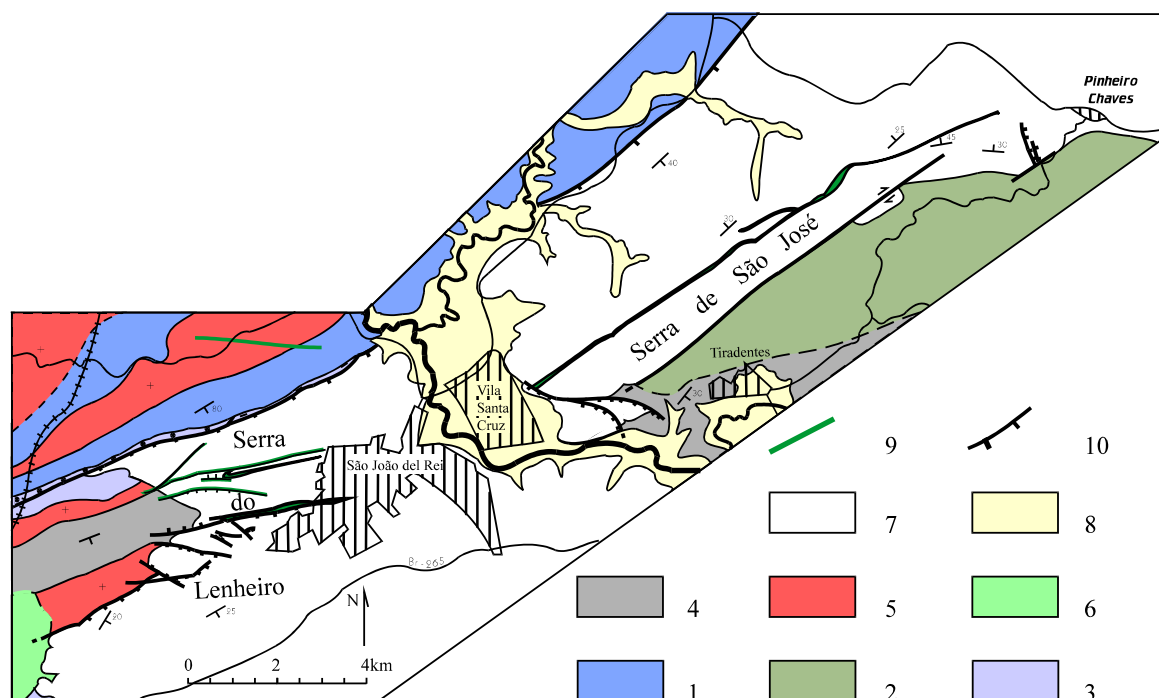


Figura 3. Embasamento da Formação Tiradentes em São João del Rei (modificado de Ribeiro, 1997). 1- Sericita filito, clorita filito, quartzito, biotita gnaisse fino, 2- metabasitos, metafelsitos, metagranitóides e metagabro, 3- quartzito, clorita filito e sericita filito, 4- sericita filito e rochas metaultramáficas, 5- metagranitóides, 6- metagabro, 7- sucessões proterozóicas das formações Tiradentes (serras do Lenheiro e São José), Barroso, Prados e do Grupo Andrelândia, 8- depósitos fluviais do Rio das Mortes. 9- diques de metabasito. 10- falhas.

2.3. A Formação Tiradentes e o rifteamento Espinhaço

As sucessões da Formação Tiradentes podem ser subdivididas em quatro sequências limitadas por discordâncias intraformacionais (Fig. 4). Estas sequências estão relacionadas com eventos extensionais que aconteceram no Mesoproterozóico, durante o rifteamento que deu origem ao Supergrupo Espinhaço (Ribeiro *et al.*, 2013).

A associação de fácies e geometria das três sequências inferiores indicam deposição em uma plataforma rasa e as inconformidades internas são ser interpretadas como geradas durante regressões marinhas (queda do nível do mar) devido a tectônica. A ausência de depósitos típicos de escarpas de falhas (ruditos) também sugerem deposição em uma plataforma rasa, extensa e plana. Esse ambiente deposicional poderia ser localizado em uma rampa do lado antitético das falhas de um sistema de rifte onde não existiriam escarpas íngremes (Ribeiro, 1997). Nas três unidades basais da formação, cristas de marcas de onda simétricas, e também assimétricas, registram uma paleolinha de costa de rumo NE-SW. Paleocorrentes para NE ficaram registradas em estratificações cruzadas de tipos planar e acanalada. Na sequência superior (delta do Lenheiro, Fig. 4), os arenitos derivados da erosão das sequências inferiores e as paleocorrentes para norte sugerem um basculamento de blocos que inverteu a pendente regional de sul para norte, expondo a plataforma a erosão e dando origem ao Delta do Lenheiro. Uma nova fase de tectonismo extensional deu origem a um exame de diques máficos e aos debritos (diamictitos, vaques, filitos) da Formação Carandaí. Na fase de quiescência seguinte foi estabelecida uma bacia de tipo *sag* onde foram depositadas as rochas carbonáticas da Formação Barroso. O conjunto foi então coberto pelos sedimentos pelíticos que deram origem a Formação Prados. Análises U-Pb em grãos de zircão detrítico indicam uma idade mínima em torno de 1.5Ga para as unidades basais e de topo da Formação Tiradentes e de 1.370Ma para debritos da Formação Carandaí (Ribeiro *et al.*, 2013). Assim, o exame de diques máficos que corta a Formação Tiradentes e não corta a Formação Carandaí deve ter se formado entre 1.5 e 1.37 Ga, um período de importante magmatismo no sistema rift Espinhaço. Já os depósitos da Formação Prados ocorrem ao longo de uma calha NE-SE que pode ser interpretada como um aulacógeno relacionado a abertura da Bacia Andrelândia, no início do Neoproterozóico, em torno de 1.0Ga atrás.

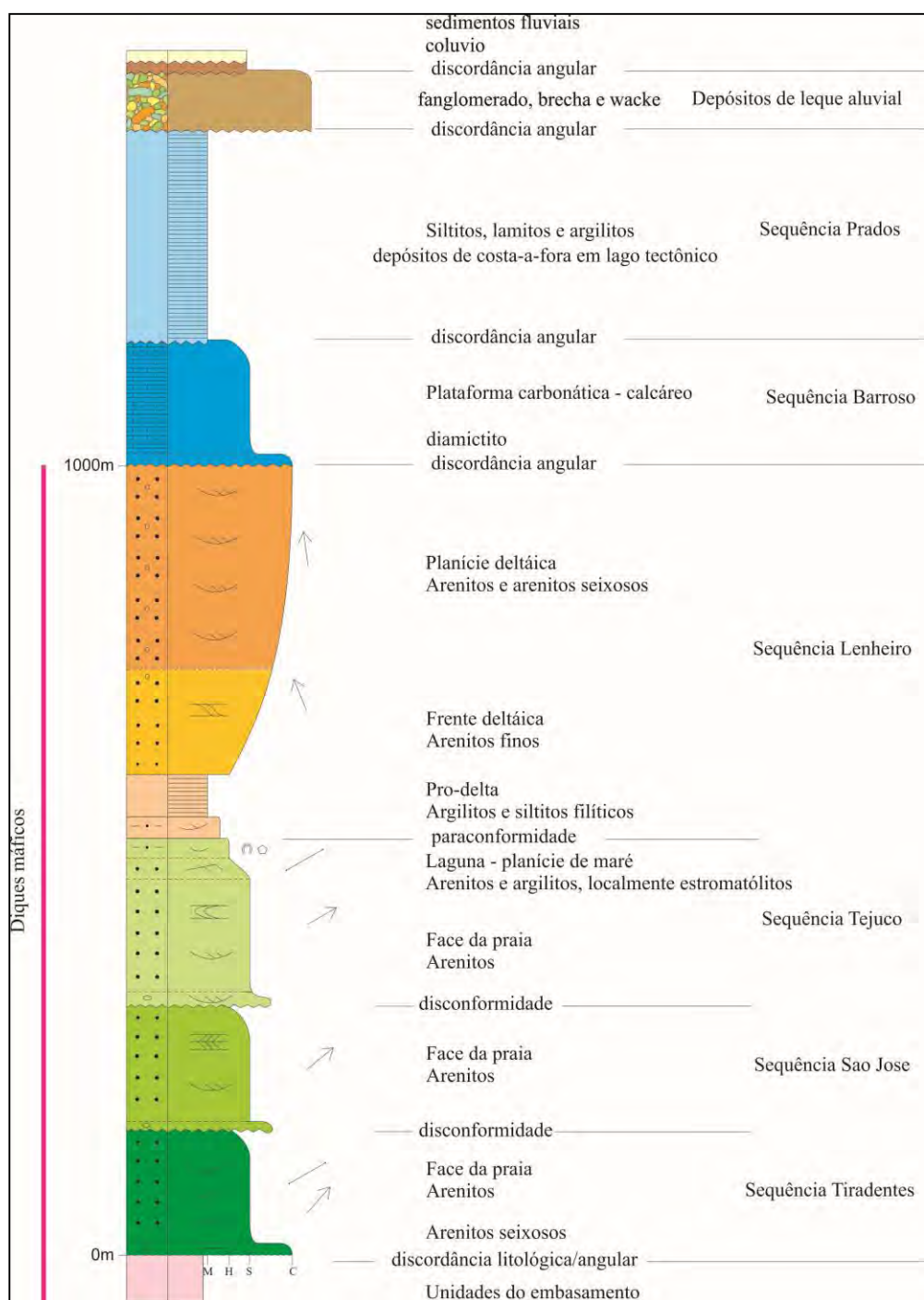


Figura 4. Coluna estratigráfica mostrando as sequências das formações Tiradentes (Tiradentes, São José, Tejuco e Lenheiro) e as formações Carandaí (representado pelo diamictito nesta figura), Barroso e Prados. No topo da coluna debritos do Terceário e sedimentos recentes e atuais. Figura de Ribeiro *et al.*, 2003.

3. Geoprocessamento

O geoprocessamento foi de grande importância no presente estudo por otimizar as saídas de campo e contribuir para a elaboração de um mapa geológico detalhado.

3.1 Confeção e integração de mapas base, imagens e modelos

Foram integrados no programa ArcGIS 9.3 modelos de relevo sombreado *hillshade* e mapa de curvas de nível confeccionados no mesmo *software* a partir do modelo digital de elevação de interferometria de radar do SRTM, um mosaico de imagens de satélite com alta resolução espacial, mapas geológicos produzidos em trabalhos de jornada de iniciação científica por Silva, D. 2012 Arruzzo, 2011 e Mafía 2014 além da carta topográfica da folha São João del Rei.

3.1.1. Produtos gerados através do SRTM

O SRTM é uma imagem de radar que contém dados de elevação atrelado ao pixel. Essa imagem possui pixel original com 30m de aresta. Cerca 80% do globo terrestre é coberto por imagens SRTM, que são disponibilizadas gratuitamente. Neste trabalho foi usado o SRTM adquirido no site <http://www.cgiar.org>.

A imagem original SRTM, com pixel original de 30 metros, foi reamostrada para 10 metros (Figura 5) pelo comando *Spline Bi-cúbica* do software FWTools, disponível gratuitamente em <<http://fwtools.maptools.org/>>, para uma maior definição e fidelidade da topografia local.

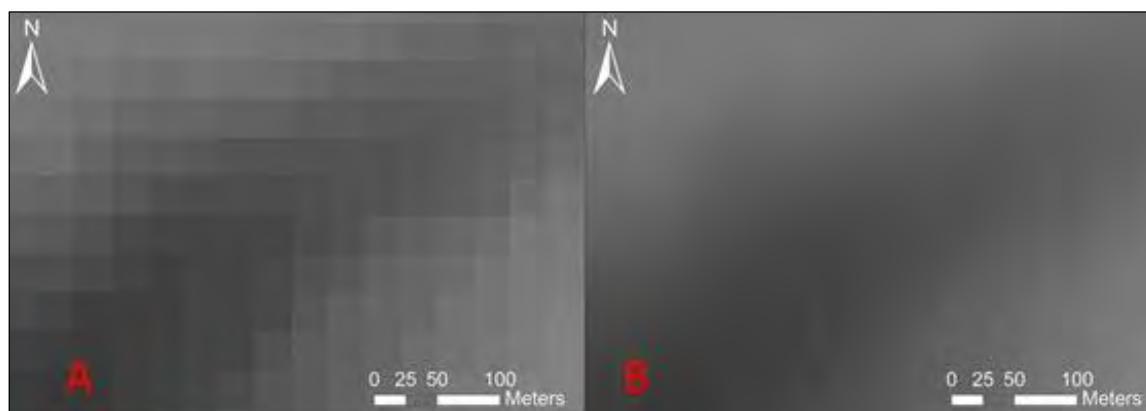


Figura 5. Comparação entre a imagem SRTM de 30 metros(A) e de 10 metros(B).

Com o SRTM reamostrado, foi gerado modelo de relevo sombreado *hillshade* e sotoposto à imagem de satélite das serras com transparência, ganhando dessa forma um aspecto de profundidade (Figura 6). Em seguida, foram geradas as curvas de nível com intervalos de 10 metros de altitude (Figura 7) no ArcGIS pelo comando *Spatial Reference*.



Figura 6. Comparação de imagens mostrando o efeito de profundidade gerado pelo SRTM sotoposto à imagem de satélite.

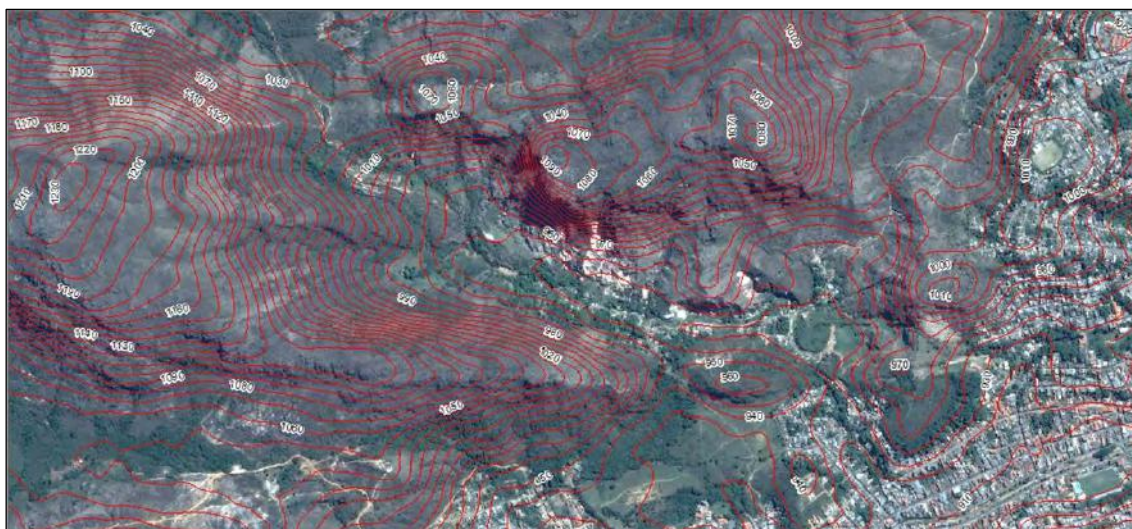


Figura 7. Resultado final das curvas de nível geradas.

3.1.2. Mosaico de Imagem e Georeferenciamento de Mapas

A folha São João del Rei foi georeferenciada no ArcGIS utilizando a ferramenta “Add X Y”. Foram adicionados 84 pontos. A imagem foi ajustada pela transformação de Polinomial de primeira ordem totalizando um erro RMS de 3,15 metros.

Com a finalidade de trabalhar com um *datum* único, foi realizada a conversão do *datum* SAD 69 da Folha São João del Rei para WGS-84, utilizando a ferramenta *transformations* nas propriedades do arquivo. A opção de trabalhar de com esse *datum* é justificável uma vez que as imagens e o SRTM, muito importantes no presente estudo, usam esse *datum* como nativo.

Com um mapa topográfico já georeferenciado, foram adicionadas imagens de satélite das Serras de São José e Lenheiro, disponibilizadas pelo *Google Earth* e capturadas do *software* Terra Incógnita.

3.2. Interpretação de mapas e estruturas geológicas.

Mapas geológicos produzidos por iniciações científicas (Nepomuceno 2009; Arruzzo, 2011) e de Silva, D. 2012 foram georeferenciados no ArcGIS (Figura 6).

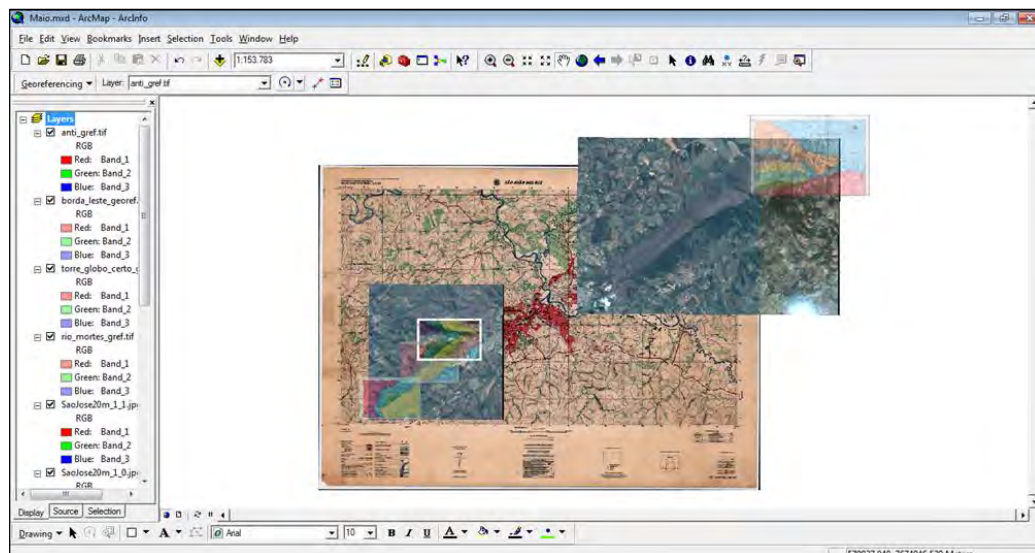


Figura 8. Mapa topográfico Folha São João del Rei 1:25.000, com os mapas geológicos de Arruzzo, 2011 e Silva, D. 2012 sobrepostos às imagens de satélite.

Os melhores exemplares dos mapas geológicos foram escolhidos e as medidas mais representativas foram adicionadas no *shape* de pontos do projeto. Medidas de acamamento sedimentar, clivagem e lineação de interseção foram as mais selecionadas, porém medidas de lineação de estiramento, orientação de veios e paleocorrentes também foram incorporadas ao projeto. Os mapas foram aprimorados por meio da fotointerpretação das imagens de satélite. Contatos litológicos foram refinados e estruturas geológicas foram interpretadas. Um exemplo disso pode ser observado no flanco sul da Serra do Lenheiro (Rio das Mortes, Fig. 9), onde foram reconhecidas falhas inéditas graças à imagem de satélite.



Figura 9. Fotointerpretação de falhas no flanco Sul da Serra do Lenheiro (Rio das Mortes).

O conjunto todo foi integrado para produção de um mapa geológico preliminar das serras do Lenheiro e São José e áreas chave foram delimitadas para mapeamento geológico detalhado e análise estrutural da Serra do Lenheiro.

Nesse sentido, o geoprocessamento se fez extremamente útil tanto para áreas já mapeadas, quanto para interpretações de zonas não mapeadas. Foi uma ferramenta utilizada tanto nas etapas pré-campo, quanto na etapa pós-campo.

Os dados gerados foram usados para produção do mapa geológico final da Serra do Lenheiro e São Jose em escala 1:16.000 (anexo 1) e um mapa de detalhe em escala 1:5.000 (anexo 2) de porção da Serra do Lenheiro.

4. Geologia da área mapeada

A Formação Tiradentes cobre seu embasamento de maneira bem evidente, por meio de uma discordância angular e litológica. É constituída por uma sucessão quartzítica plataformal com cerca de 1000m de espessura (Fig. 4), que durante a orogênese brasileira foi deformada e metamorfizada em fácies xisto-verde, o que gerou clivagem ardosiana, cloritóide e cianita, e parcial recristalização das rochas (Ribeiro, 1997). Entretanto, na maioria dos afloramentos a composição e estruturas originais estão preservadas, além dos contatos primários e inclusive discordâncias. Assim, Ribeiro et al (2003) definiram as sequências Tiradentes, São José, Tejuco e Lenheiro como pode ser observado na figura 4. Nas quatro sequências da Formação Tiradentes a composição é quartzosa, predominando metaquartzo-arenitos. Os metapelitos contêm mica branca e quartzo. Intercalações de metacalcários ocorrem localmente na Sequência Tejuco.

4.1 Sequência Tiradentes

Assenta sobre a superfície irregular do embasamento caracterizando uma discordância. Trata-se de um pacote de 200 metros de espessura de quartzitos, o qual são caracterizados por apresentarem camadas delgadas com marcas de ondas e espessas com estratificação cruzada planar e acanalada (Fig. 10). Os depósitos são interpretados como de ambiente marinho raso.



Figura 10. Camadas com marcas de onda e camadas com estratificação cruzada na Formação Tiradentes no flanco sul da Serra do Lenheiro.

4.2 Sequência São José

Esta sequência apresenta espessuras entre 90 e 150 metros e suas rochas constituem os pontos mais altos na Serra de São José, que lhe empresta o nome. Sua principal característica é o predomínio de sucessões quartzíticas (metaquartzo-arenitos) bem litificadas e recrystalizadas maciças. Estas sucessões se destacam também na paisagem pela frequente presença de camadas espessas ou muito espessas (50-150 cm; Fig. 11). Seu contato com a unidade inferior é interpretado como uma disconformidade (Fig. 4). O paleoambiente também é interpretado como marinho raso.



Figura 11. Estratificação cruzada de grande porte separadas por outras de pequeno porte na Sequência são José, flanco sul da Serra do Lenheiro.

4.3 Sequência Tejuco

Com cerca de 150 metros de espessura, esta sequência é dividida em 3 unidades de mapeamento: quartzítica com intercalações pelíticas; fácies heterolítica e calcáreos (vide mapa geológico - anexo 1). As camadas quartzíticas ocorrem em camadas delgadas ou acamamento lenticular delgado com intercalações pelíticas. Frequentemente apresentam estruturas cruzadas acanaladas (Fig. 12).

A fácies heterolítica apresenta marcas de ondas e gretas de ressecamento e sua proporção de areia e silte é variável, formando estruturas *flasers* e *wavy*. A espessura das fácies varia de acordo com a área, mas de maneira geral apresenta 10 metros, podendo não existir em alguns pontos. As gretas de ressecamento (Fig. 13) evidenciam exposição subaérea e sua interpretação é de um ambiente inter-maré.

Os metacalcários ocorrem nas imediações do Córrego do Lenheiro, em camadas tabulares brancas maciças ou com estromatólitos do tipo colunar e colunar alongado.



Figura 12. Estratificação cruzada acanalada em quartzito da Sequência Tejuco no flanco norte da Serra do Lenheiro.



Figura 13. Greta de ressecamento em fácies heterolítica da Sequência Tejuco na Serra de São José.

4.4 Sequência Lenheiro

Com espessuras entre 500 e 600m, esta sequência é interpretada como um delta de rio entrelaçado, o Delta do Lenheiro (Ribeiro, 1997). Pode ser dividida em três unidades de mapeamento distintas.

A primeira é essencialmente pelítica e interpretada como depósito de pró-delta. A segunda é composta por arenitos finos de frente deltaica e a última inclui arenitos, arenitos seixosos e conglomerados de planície deltaica. O contato entre essas unidades é gradacional.

4.4.1 Pelitos

São rochas esbranquiçadas ou acinzentadas, geralmente maciças e delgadas. Segundo Valeriano (1985) sua espessura chega a 25 metros no flanco norte da Serra do Lenheiro. Em alguns pontos possuem pirita limonitizada e manchas de redução (Fig. 14).



Figura 14. Manchas de redução em pelito da Sequência Lenheiro no flanco norte da Serra do Lenheiro.

4.4.2 Quartzito Fino

É composta por quartzo-arenitos (quartzitos) esbranquiçados, a maioria finos, micáceos (muscovita, sericita) e friáveis em camadas delgadas a espessas maciças ou

com estratificação cruzada (Fig. 15). As melhores exposições localizam-se na Serra do Lenheiro, onde a unidade alcança 100m de espessura. O aparecimento de seixos coincide com o aumento da granulometria dos arenitos, marcando a passagem para a próxima unidade.



Figura 15. Quartzito fino da Sequência Lenheiro no flanco norte da Serra do Lenheiro.

4.4.3 Quartzito Seixoso

Com até 400m de espessura, caracteriza-se pela abundância de quartzitos grossos seixosos (Fig. 16). Estas rochas ocorrem em camadas delgadas até espessas maciças ou com estratificação cruzada. Esporádicos cristais de cloritóide e cianita metamórficos cresceram na matriz e em intraclastos pelíticos.



Figura 16. Níveis seixosos em quartzito da Sequência Lenheiro.

4.5 Diques de metabasito

Diques máficos cortam o embasamento e as sequências da Formação Tiradentes (Fig. 4). São corpos de espessura métrica a decamétrica, de direção NE-SW com mergulhos íngremes para NNW ou SSE. Foram mapeados 4 diques no flanco norte da Serra do Lenheiro onde foi feita análise estrutural do presente trabalho.

Os diques são metabasitos verdes, mas na maioria dos afloramentos aparecem argilizadas, com cores amareladas e avermelhadas. Muitas vezes mostram uma clivagem ardosiana imposta sobre a matriz original fina, maciça ou com laminação de fluxo ígneo (Fig. 17).



Figura 17. Laminação de fluxo ígneo em dique metabásico no flanco norte da Serra do Lenheiro.

4.6 Pelito Prados

Trata-se de uma sucessão pelítica com 300 metros de espessura mínima que ocorre em discordância angular sobre as formações Tiradentes, Carandaí e Barroso e sobre o embasamento Paleoproterozóico. Esta formação pode registrar a deposição em uma calha rifte relacionada a Bacia Andrelândia, uma margem passiva neoproterozóica (Ribeiro *et al.*, 2013).

5. Geologia Estrutural

Na região de São João del Rei, na borda sul do Cráton São Francisco, ocorre a superposição de pelo menos três bacias distintas, São João del Rei, Carandaí e Andrelândia, preservadas dentro de um gráben de aproximadamente 320 km². Nestas bacias afloram rochas metassedimentares proterozóicas que constituem as formações Tiradentes (Bacia São João del Rei), Carandaí, Barroso, Prados (Bacia Carandaí) e Megassequência Andrelândia. A inversão tectônica ocorreu há cerca de 600Ma, durante a orogenia brasileira (Trouw e Pankhurst, 1993; Söllner e Trouw, 1997; Heilbron *et al.*, 2000), em condições metamórficas de fácies xisto verde, zona da biotita (Valeriano 1985, 1986).

Na região do presente trabalho a deformação dúctil atuou sobre as sucessões sedimentares e estruturas rúpteis pretéritas como falhas relacionadas à abertura das bacias. Resultou em um arcabouço estrutural complexo, fruto de etapas de deformação rúptil distensiva e posterior deformação dúctil compressiva. Nesse trabalho foi realizada a análise estrutural da porção norte e central da Serra do Lenheiro (anexo 2, mapa geológico da serra do Lenheiro)

5.1. Dobras

A Serra do Lenheiro constitui um anticlinal aproximadamente simétrico (Fig.19) com cerca de 4 km de comprimento de onda com flancos mergulhando em torno de 20° para SE e NE (Fig. 18), e baixo caimento para ENE. Vinculados a essa dobra regional ocorrem dobras parasíticas assimétricas plongeantes abertas a fechadas reviradas, todas com charneiras arredondadas. Essas dobras têm vergência para NW e amplitudes de até 150m. Nos metapelitos foram constatadas até 4 ordens de dobramento.

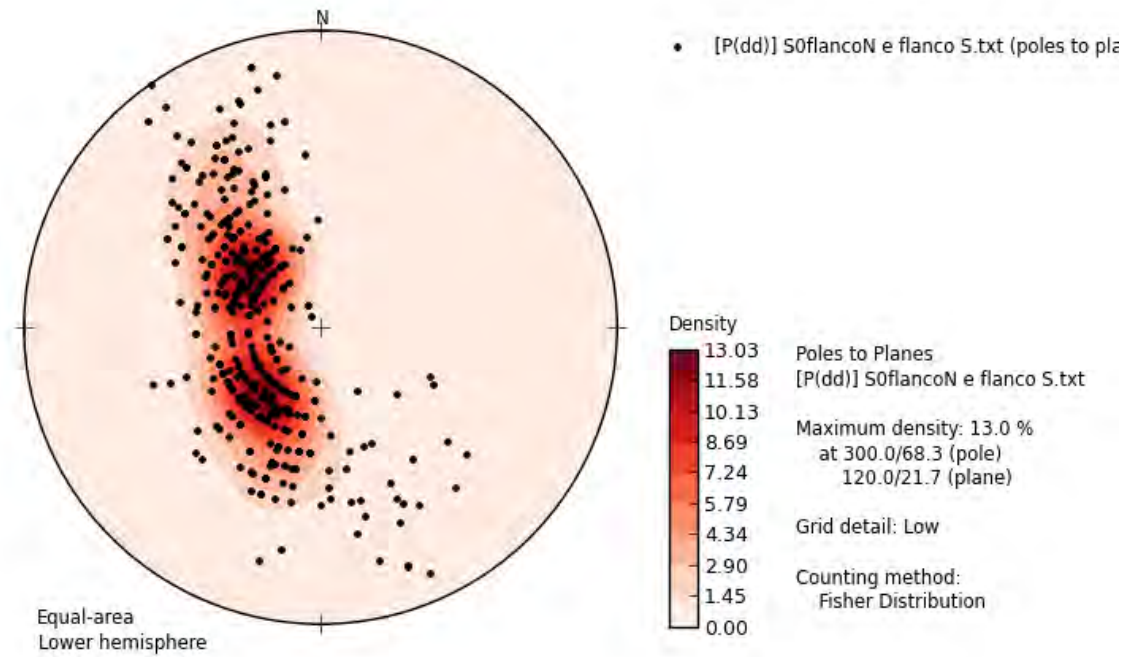


Figura 18. Estereograma de igual área de pólos de planos de acamamento sedimentar nos flancos sul e norte da Serra do Lenheiro, hemisfério sul.



Figura 19. Anticlinal do Lenheiro. Flancos com mergulho médio de 20° para NE e SE.

5.2. Clivagem

Os quartzitos apresentam clivagem ardósiana espaçada S1 em leque com mergulhos íngremes para SE. No estereograma da figura 20, também são visíveis uma população menos expressiva de planos apresentando mergulhos suaves que foram tomadas em quartzitos pertencentes a flancos íngremes das dobras parasíticas.

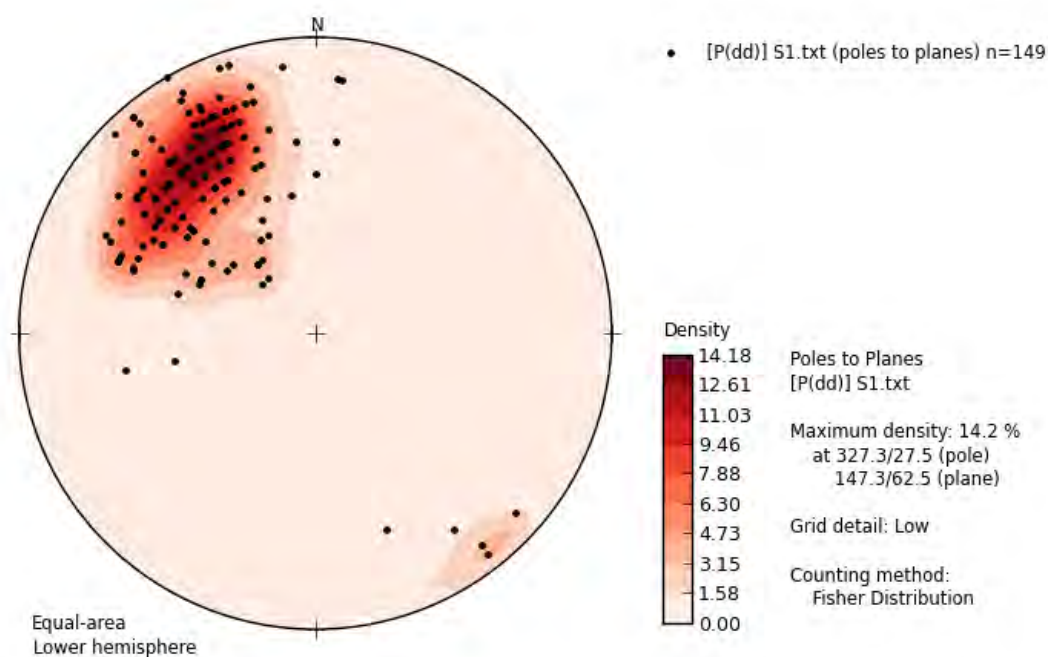


Figura 20. Estereograma de igual área de pólos de planos de clivagem na Serra do Lenheiro, hemisfério sul.

5.3. Lineação

A lineação L1 (Fig. 21), paralela aos eixos das dobras, mostra caimento médio de 14° para ENE. Essa lineação compreende principalmente a lineação de interseção da clivagem S1 com o S0 e a lineação de crenulação D1 observada em alguns filitos (Fig. 22).

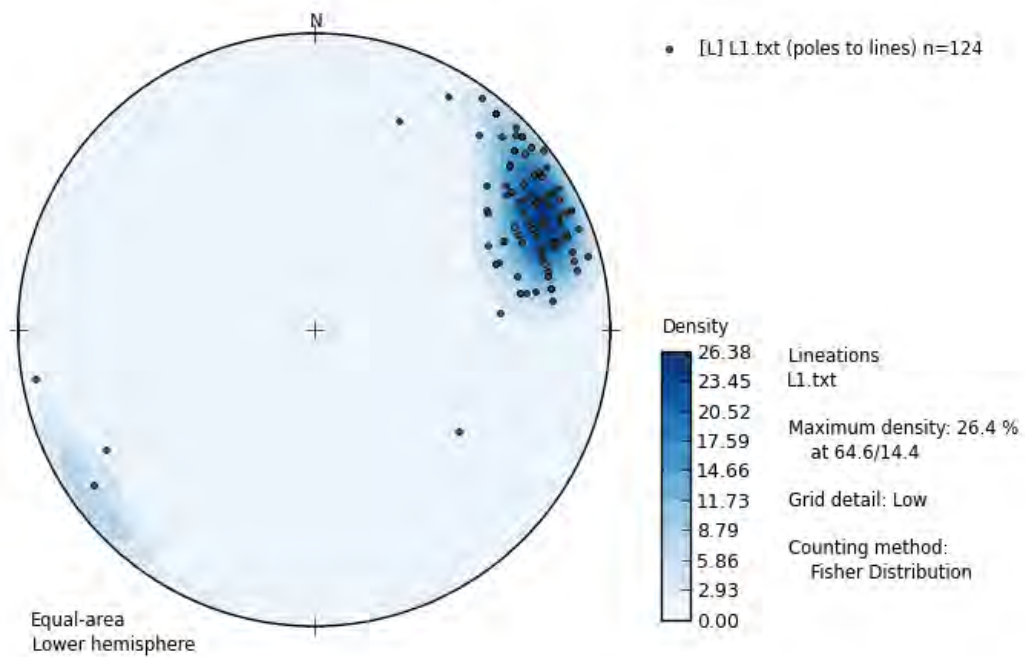


Figura 21. Estereograma de igual área de caimento de lineações de interseção na Serra do Lenheiro, hemisfério sul.



Figura 22. Crenulação D1 em pelitos da Formação Prados.

Infere-se que tal crenulação tenha se formado em uma única fase de deformação dúctil (D1), por ter eixo coincidente com a lineação de interseção descrita acima. Acredita-se que essas rochas pelíticas possuíam alguma fissilidade pretérita, que durante o soterramento geraram uma foliação. Essa foliação foi posteriormente crenulada pela deformação regional brasileira.

Ocorrem em raros afloramentos da Fm. Tiradentes, filitos com duas crenulações superimpostas (Fig. 23). A crenulação mais jovem tende a ser simétrica e tem traço axial aproximadamente N-S com plano axial subvertical (Fig. 23). Acredita-se que seja associada a um dobramento mais novo, que faz com que as L1 caiam para NE na Serra do Lenheiro e para SW na Serra de São Jose. Essa última fase de deformação dúctil na área é pouco expressiva e pode ter gerado um leve arqueamento das lineações L1.

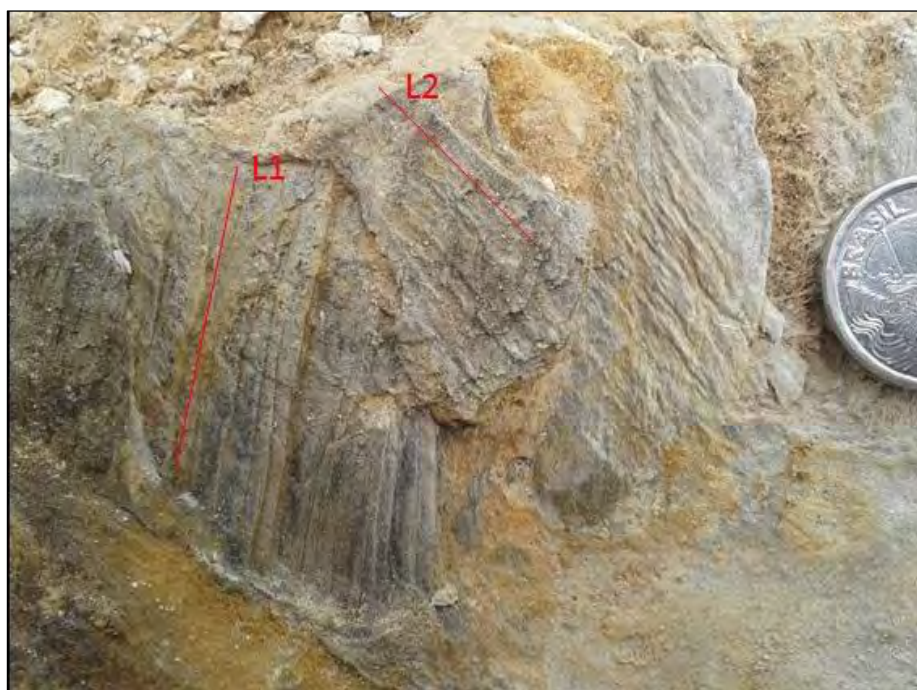


Figura 23. Pelito da Formação Tiradentes com lineação de crenulação L1 cortada por L2.

5.4. Falhas e zonas de cisalhamento

Duas orientações principais de falhas ocorrem na Serra do Lenheiro: NE-SW, e NW-SE. A família NW-SE apresenta falhas com rejeito mínimo de 50 metros e estão em maior distribuição ao longo da área. Essa família configura grabéns bem definidos no flanco sul do anticlinal do lenheiro e apresentam brechas com clivagem. A família NE-SW apresenta as falhas com maior continuidade em mapa e são associadas a diques

e *tension gashe veins*. As principais falhas são a falha do paredão (Fig.24), localizada no flanco sul do anticlinal do lenheiro, e a falha do lenheiro no flanco norte que põe as sucessões da Fm. Tiradentes diretamente em contato truncado com o embasamento.

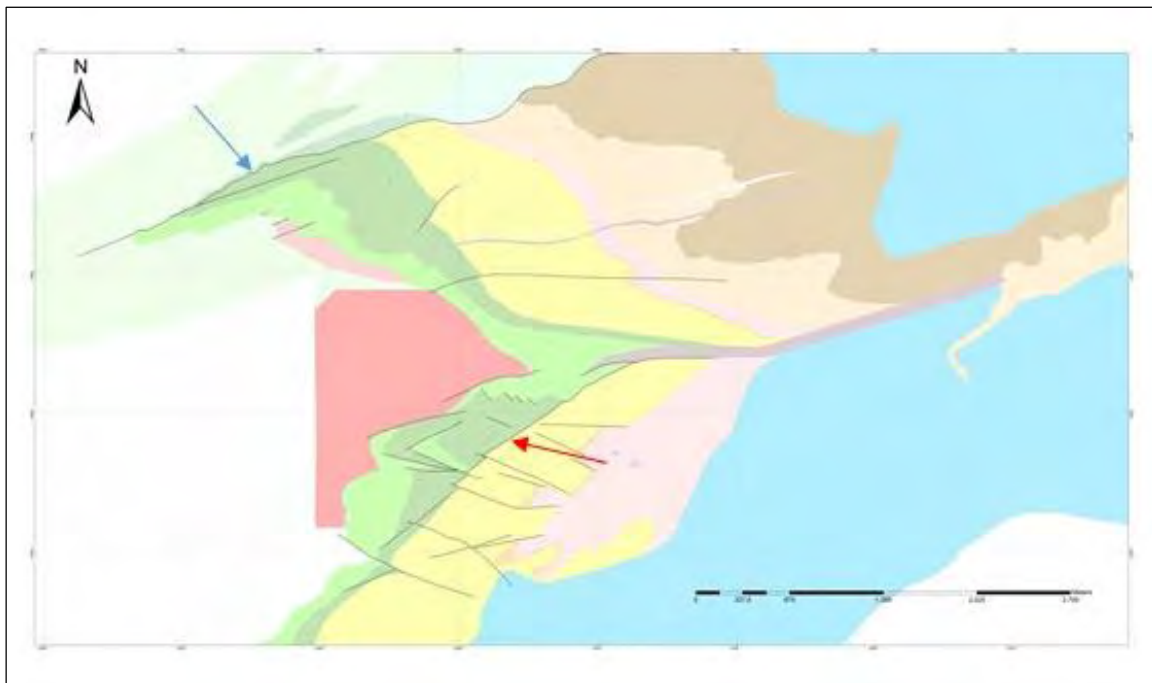


Figura 24. Mapa geológico do flanco norte da Serra do Lenheiro com destaque para falha do paredão (seta em vermelho) e do Lenheiro (seta em azul). Legenda segundo o anexo 1.

A idade dos falhamentos na região ainda é um tema controverso. Algumas falhas apresentam evidências de terem se originado antes da deformação dúctil regional, ou seja, concomitantes com a formação/evolução das bacias proterozóicas São João Del Rei (SJDR) e Carandaí. Como não existe evidência de crescimento sedimentar nos blocos abatidos da Fm. Tiradentes (falha de crescimento), a possibilidade de terem se originado durante a configuração da bacia SJDR é excluída. Desse modo interpretam-se essas falhas como falhas extensionais da evolução da Bacia Carandaí. O registro geológico que suporta essa hipótese se faz por meio de brechas com desenvolvimento de clivagem S1 em falhas de rumo NW-SE (Fig. 25 e 26)



Figura 25. Brecha de falha com desenvolvimento de clivagem no flanco norte da Serra do Lenheiro.

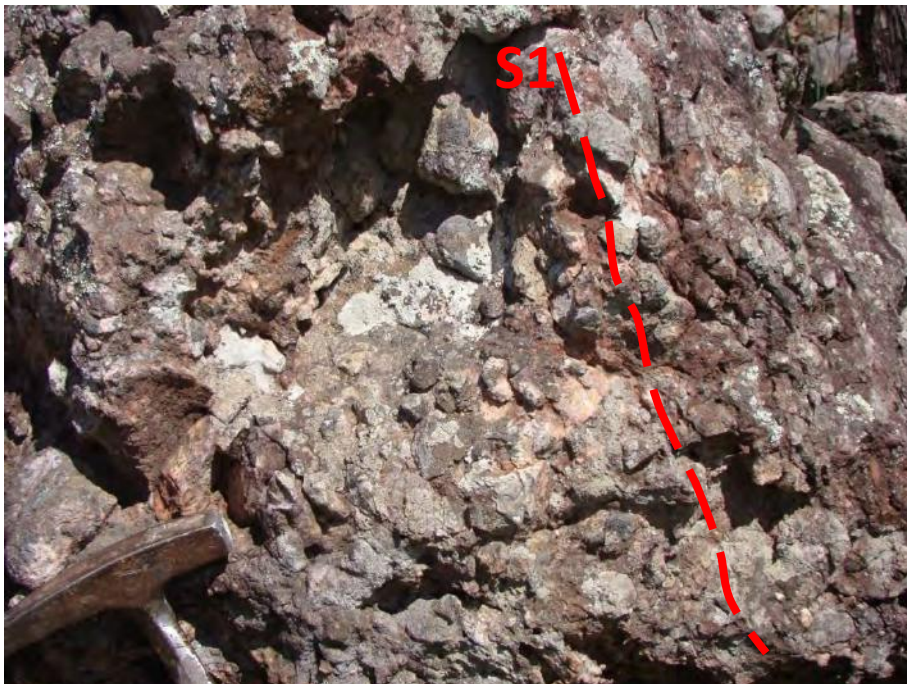


Figura 26. Brecha de falha com desenvolvimento de clivagem na área do anticlinal do Lenheiro.

Já as falhas NE-SW não apresentam brechas com desenvolvimento de clivagem. São comumente associadas a diques e *tension gash veins*. As envoltórias dessas

estruturas fazem baixos ângulos em relação à direção das falhas NE-SW. Isto sugere um movimento oblíquo transcorrente nessas falhas, provavelmente relacionado a uma reativação durante o evento brasileiro, no Neoproterozóico.

A falha do Lenheiro tem orientação NE-SW e limita as sucessões metassedimentares da Formação Tiradentes em um contato truncado com o embasamento. Essa falha apresenta rejeito vertical cerca de 500m mensurado em seção geológica (anexo 3).

. Nessa zona de falha ocorrem quartzitos miloníticos com lineação de estiramento horizontal que não justificam tal rejeito. Tal fato somado à ocorrência de corpos lenticulares de metabasito deformados nessa zona indicam que essa pode ter sido uma falha importante na bacia.

Além de falhas antigas anteriormente descritas, reativadas no Neoproterozóico, na área do anticlinal do Lenheiro ocorrem estrias de falhas obliquas de baixo caimento (Fig. 27). Como acredita-se que essas lineações não se preservariam durante o metamorfismo brasileiro interpreta-se, nesse trabalho, que essas lineações estejam relacionadas a uma possível reativação Cenozóica.

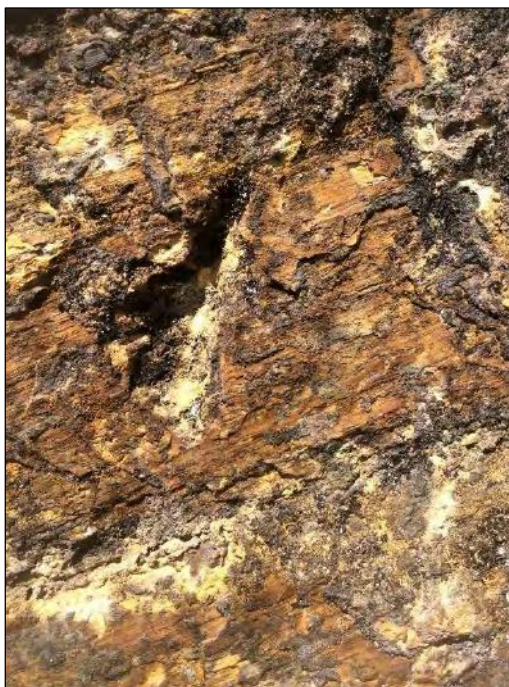


Figura 27. Estria de falhas com baixo caimento indicando movimentação transcorrente em metabasito no anticlinal do Lenheiro.

5.5. Veios

Aparecem encaixados nas rochas da Formação Tiradentes, ou ao longo dos diques e falhas que as cortam. A maioria dos veios têm espessura centimétrica a decimétrica e se estendem ao longo do rumo por distâncias até decamétricas.

No flanco norte da Serra do Lenheiro os veios adquirem duas direções de mergulho predominantes, uma para SE e outra para W-SW (Fig.28). Em escala de afloramento os veios se cortam mas aparentemente sem deslocamento.



Figura 28. Padrões de veios no flanco norte da Serra do Lenheiro.

Em geral os veios são compostos por quartzo branco, as vezes leitoso. Localmente ocorrem veios com cianita, ou com clorita, pirita e ouro, como já notado por Rolff (1951). Nos veios com cianita este mineral frequentemente aparece em cristais até centimétricos com quartzo em disposição perpendicular as paredes do veio. Já os veios com pirita, via de regra, associam-se a fácies heterolíticas e pelíticas da Sequência Tejuco e muitas vezes estão mineralizados com ouro (Ribeiro *et al.*, 1992)

Ocorrem veios de quartzo dobrados (ou seja, formados cedo em relação à deformação dúctil) e retilíneos (tardios), independente da orientação.

Na porção central da Serra do Lenheiro ocorrem veios de quartzo sigmoidais escalonados (*tension gash veins*-TGV) com duas orientações principais de suas envoltórias. Os TGV de orientação NE-SW exibem movimento sinistrais (Fig. 29), enquanto que os da família ENE-WSW classificam-se como dextrais.



Figura 29. *Gash Veins* com envoltória NE-SW na área do anticlinal do Lenheiro.

Esses veios dobrados indicam movimentos transcorrentes e quando associados a falhas, evidenciam reativações que ocorreram durante a deformação brasileira. As reativações são oblíquas, contudo são mais transcorrentes do que reversas uma vez que o rejeito maior continua sendo normal.

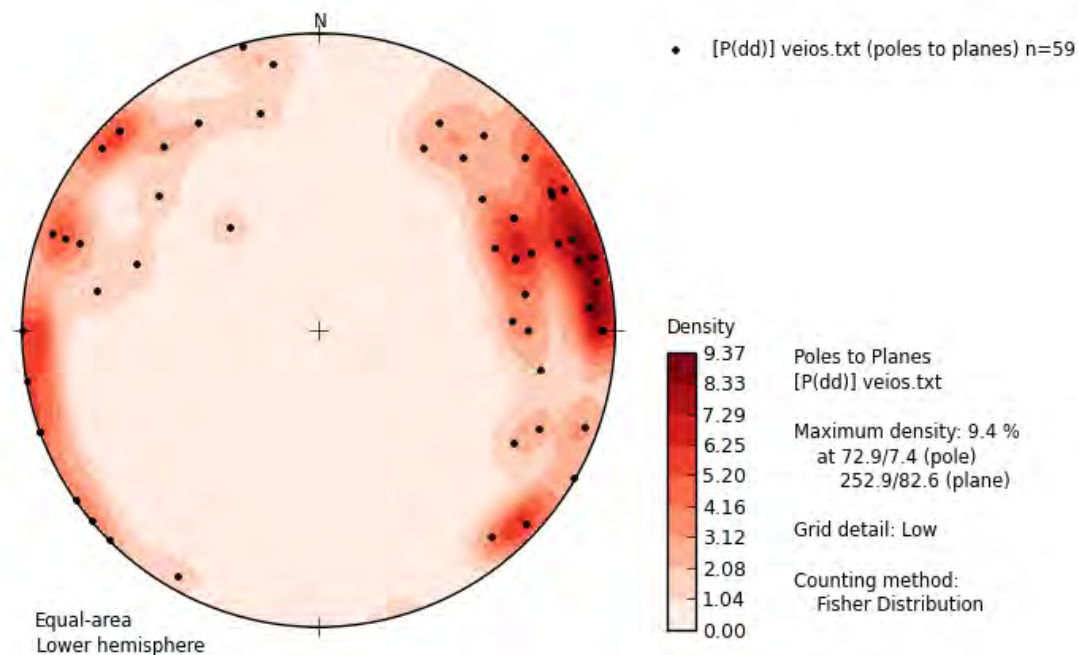


Figura 30. Estereograma de igual área de pólos de planos de falhas no flanco norte da Serra do Lenheiro.

5.6. Conclusões-fases de deformação

Diante dos dados levantados pela análise estrutural podemos chegar a algumas conclusões sobre a tectônica que atuou na Formação Tiradentes.

Primeiramente vimos falhas velhas (Fig. 31) relacionadas a formação de bacias sedimentares.

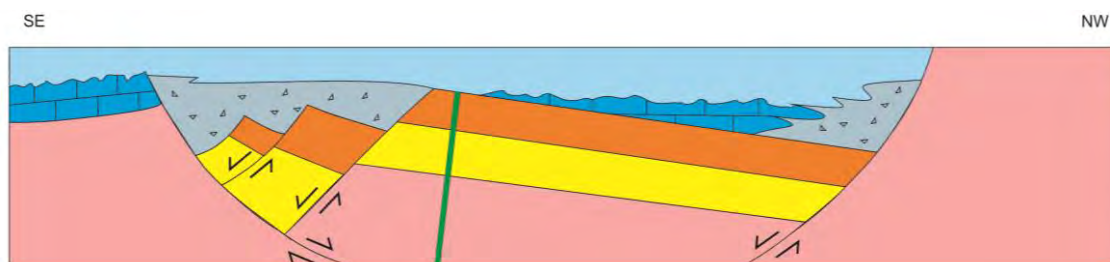


Figura 31. Seção esquemática mostrando a influência de falhas WNW-ESE na formação da Bacia Carandaí (Ribeiro, 1997).

Sob o regime dúctil da deformação brasileira as rochas da Fm. Tiradentes geraram dobras abertas com mergulhos médios de 20° para NE e SE, eixos com baixo caimento para NE e clivagem plano axial de dobras com mergulho íngreme para SE.

Esse evento tectônico reativou falhas em movimentos transcorrentes evidenciados por *tension gash veins*.

Uma nova tectônica possivelmente cenozoica reaproveitou planos de falhas gerando estrias (Fig.27) e depósitos de leques. Contudo, esse assunto ainda é pouco estudado. Infere-se que essa movimentação tectônica está ligada a formação da bacia cenozoica Rio da Mortes.

6. Conclusões e Discussões

Por meio do mapa geológico gerado e do mapeamento de campo foi possível separar algumas etapas da evolução tectônica da Formação Tiradentes. Primeiramente vimos falhas (Fig. 31) relacionadas a formação de bacias sedimentares. Essas falhas possuem brechas com desenvolvimento de clivagem e sua orientação é WNW-ESE. Sua idade é provavelmente mesoproterozóica e são cobertas pela Formação Prados.

Durante o Neoproterozóico, sob o regime dúctil relacionado à deformação brasileira as rochas da Fm. Tiradentes geraram dobras abertas com mergulhos médios de 20° para NE e SE, eixos com baixo caimento para NE e clivagem plano axial de dobras com mergulho íngreme para SE, indicando uma compressão NW-SE. Sob esse regime dúctil, falhas de orientação NE-SW foram reativadas com rejeito transcorrente, evidenciados por *tension gash veins* na porção central da Serra do Lenheiro.

O metamorfismo foi de fácies xisto-verde confirmado pelo crescimento de cloritóide, biotita e cianita nas rochas da Formação Tiradentes. Ainda no Neoproterozóico uma outra fase de deformação foi evidenciada por uma lineação (L2), de traço N-S. Contudo, essa fase de deformação não influencia de maneira efetiva a área de estudo.

Além disso, estrias de falhas com baixo caimento são vistas em falhas na porção central da Serra do Lenheiro indicando uma tectônica possivelmente Cenozóica. Depósitos de leques na borda leste da Serra de São José são relacionados a essa tectônica. Contudo, esse tema ainda é pouco estudado e gênese dessas falhas ainda é controversa.

7. Referências Bibliográficas

Acesso ao site <<http://www.cgiar.org>.>

Alkmim, F.F., 2004. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Dal Ré Carneiro C. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, Editora Beca, São Paulo

Arruzzo, F., Pires, G., 2011. Mapa Geológico do Anticlinal do Lenheiro. Trabalho de Iniciação Científica.

AVILA, C. (1992) Geologia, Petrografia e Geoquímica das rochas Precambrianas (unidade metadiorítica Itutinga e unidade metatrandjemítica Caburú) intrusivas nas rochas do Greenstone Belt Barbacena, São João del Rei, Minas Gerais. Tese de Mestrado, IGEO-UFRJ, Rio de Janeiro

Ávila, C. A., Teixeira, W., Cordani, U.G., Moura, C.A.V., Pereira, R. M., 2010. Rhyacian juvenile accretion in the southern São Francisco craton, Brazil: Geochemical and isotopic evidence from the Serrinha magmatic suite, Mineiro Belt. *Journal of South American Earth Sciences*.

Barbosa, J.S.; Sabaté, P., 2004. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Cráton, Bahia, Brazil: geodynamic features. *Precambrian Research* 133.

BARBOSA, O. (1954) Evolution du geosynclinal Espinhaço. *International Geological Congress, Comptes Rendus, Section XII: 2-37. Argel, Argelia, 1952*

Chemale Jr., F., Kawashita, K., Dossin, I.A., Ávila, J.N., Justino, D., Bertotti, A.L., 2012. U- Pb zircon in situ dating with LA-MC-ICP-MS using a mixed detector configuration. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*

Danderfer, A., De Waele, B., Pedreira, A., Nalini, H.A., 2009. New geochronological constraints on the geological evolution of Espinhaço basin within the São Francisco craton- Brazil. *Precambrian Research*

EBERT, H. (1957a) Aspectos principais da geologia de São João del Rei, Estado de Minas Gerais. Relatório inédito da PROSPEC, 120p. Publicado "in memoriam" pela SBG, Núcleo São Paulo. Publicação 12/1984

Mafia, M., Oliveira, L., 2014. Mapa Geológico da borda oeste da Serra de São José. Trabalho de Iniciação Científica.

Martins-Neto, M.A., 2000. Tectonics and sedimentation in a paleo/mesoproterozoic rift-sagbasin (Espinhaço basin, southeastern Brazil). *Precambrian Research* 103, 147–173.

Martins-Neto, M.A., 2009. Sequence Stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*

Nepomuceno, F., 2009. Mapa Geológico da borda oeste da Serra de São José. Trabalho de Iniciação Científica.

NOCE, C.M. (1988) Evolução estrutural da faixa setentrional do Grupo São João del Rei, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências* 18 (4): 398-405. São Paulo, SP.

Oliveira, E.P., McNaughton, N.J., Armstrong, R., 2010 Mesoarchaeon to Palaeoproterozoic growth of the northern segment of the Itabuna Salvador Curaçá orogen, São Francisco craton, Brazil. *Geological Society Special Publication*.

Paciullo, F.V.P., Ribeiro, A., Andreis, R.R., 1993. Reconstrução de uma bacia fragmentada: o caso do Ciclo Depositional Andrelândia. In: II Simpósio sobre o Cráton do São Francisco

RIBEIRO, A. 1997. Estratigrafia e Paleoambientes nas sucessões Metassedimentares Proterozóicas das serras do Lenheiro e São José, São João del Rei, sul de Minas Gerais

Silva, D., 2012. Mapa Geológico do Flanco Norte da Serra do Lenheiro. Trabalho de Iniciação Científica.

RIBEIRO, A. 2003. Relatório da Folha São João del Rei. COMIG.

Silveira, E.M, Söderlund, U., Oliveira, E.P., Ernst, R.E., Menezes Leal, A.B., 2012. First precise U-Pb baddeleyite ages of 1500 Ma mafic dykes from the São Francisco Craton, Brazil, and tectonic implications.

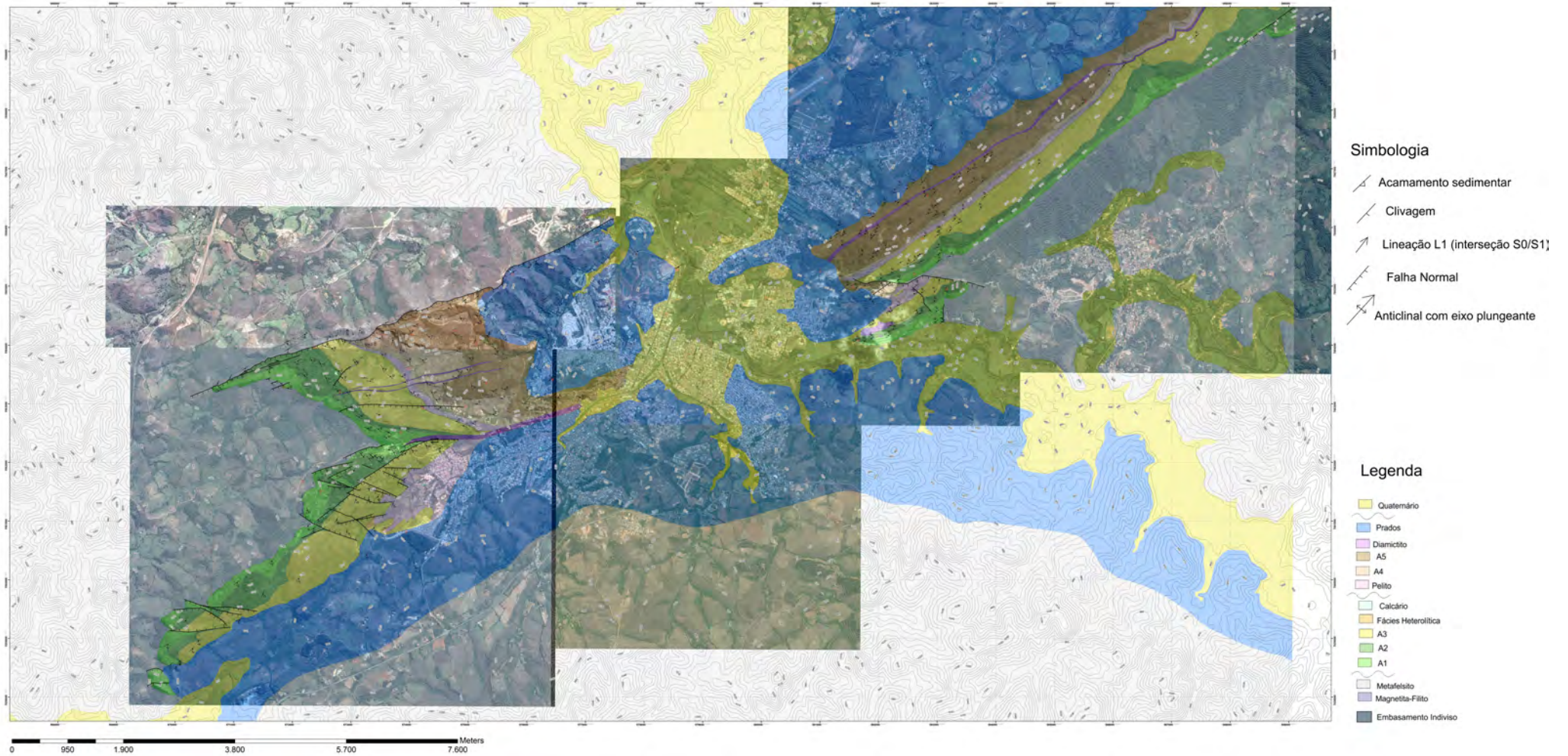
Teixeira, W., Figueiredo, M.C.H., 1991. An outline of Early Proterozoic crustal evolution in the São Francisco craton, Brazil: a review. *Precambrian Research*

Teixeira, W., Sabaté, P., Barbosa, J., Noce, C.M., Carneiro, M.A., 2000. Archean and Paleoproterozoic Evolution of the São Francisco Craton, Brazil. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America*. International Geological Congress 31

VALERIANO, C.M. (1985) *Geologia estrutural e estratigrafia do Grupo São João del Rei*. Dissertação de mestrado, 83 p., inédito, IGEO-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.



Mapa geológico das Serras do Lenheiro e São José





Mapa Geológico do flanco norte da Serra do Lenheiro

